

## Контроль качества металлобетонного хранилища для отработанного ядерного топлива

© Н.Д. Щиголев, В.А. Соловей, М.Р. Колхидашвили, А.М. Пирогов

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,  
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия  
e-mail: Shchigolev@pik.pnpi.nw.ru

(Поступило в Редакцию 29 ноября 2010 г.)

Условиями изготовления и безопасной эксплуатации серийного металлобетонного контейнера для отработанного ядерного топлива (ОЯТ) предусмотрена дефектоскопия его бетонного наполнителя, а также контроль соответствия характеристик радиационной защиты корпуса изделия заданным конструкторской документацией.

Описан принцип работы испытательного стенда  $\gamma$ -контроля таких контейнеров, предназначенных для хранения и транспортировки  $(5-7) \cdot 10^3$  kg ОЯТ активностью  $\sim 10^6$  Ci, в том числе новая версия стенда. Представлены кинематика стенда, электронное и программное обеспечение с техническими решениями, повышающими как живучесть и надежность комплекса, так и достоверность результатов выполняемых с его помощью измерений.

### Введение

Безопасность — одна из важнейших проблем ядерной энергетики. В этом ключе вполне объяснимо и логично, что длительное надежное хранение и транспортировка отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и их безопасность постоянно находятся в центре внимания наших ядерщиков.

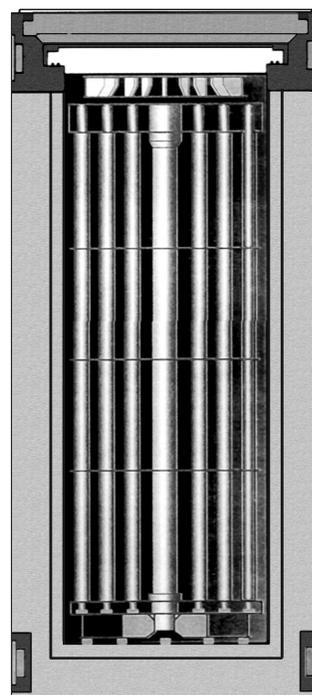
Многие годы в России и за ее пределами, например, в Германии, было принято использовать металлические (стальные, чугунные) контейнеры для ОЯТ реакторов АЭС, атомных субмарин, атомного ледокольного флота, исследовательских реакторов, как и для радиоактивных отходов. Серьезным прогрессом явились разработка, расчет и создание в Конструкторском бюро специального машиностроения (ОАО „КБСМ“, СПб) металлобетонного контейнера — основы транспортно-упаковочного комплекта (ТУК) МБК для сухого длительного экологически безопасного хранения и транспортировки ОЯТ (рис. 1).

МБК — это три соосных цилиндра из спецстали, между ними армокаркас с особо прочным сверхтяжелым бетоном высокой пластичности. Конструкция ТУК МБК с ОЯТ обеспечивает выполнение требований национальных правил и рекомендаций МАГАТЭ, предъявляемых к упаковкам типа  $B(U)$  [1]. Так, ТУК МБК должен выдерживать жесткие условия испытаний, имитирующих аварии при транспортировке — падение с высоты 9 м на недеформируемую плиту и с 1 м — на штырь, а также тепловые испытания. По требованиям к качеству бетонного наполнителя корпуса в нем, в частности, не допускаются дефекты сплошности глубиной более 20 мм.

Кроме того, корпус МБК должен обеспечивать уровень радиации за внешней поверхностью контейнера в соответствии с требованиями [1] и нормами радиационной безопасности НРБ-99/2009.

Размеры и масса МБК в зависимости от конкретного топлива меняются в широком диапазоне. Так, масса ТУК МБК для топлива с АПЛ не превышает 40 t, тогда как ТУК МБК в случае реакторов РБМК-1000 весят до 125 t (с учетом массы защитно-демпфирующего кожуха). Высота контейнеров около 5 м, диаметр 1500–2400 мм, толщина металлобетонной стенки 400 мм.

Поскольку основное радиационное воздействие ОЯТ — это гамма-излучение, уровень радиационной защиты (РЗ) МБК определяется массовой толщиной  $\rho d$  стенки контейнера. На качество РЗ могут влиять как нарушения сплошности бетонного наполнителя —



Capacity  $6.5 \cdot 10^3$  kg ( $UO_2$ )

Flask mass  $85 \cdot 10^3$  kg

External diameter 2.3 m  
Length 4.8 m

Ext. and internal Corrosion-  
casing material proof steel

Flask case filler Superstrength  
superhard  
concrete

Flask surface  
radiation level  $<50$  mBarr/h

Рис. 1. Металлобетонный контейнер ТУК МБК.

полости, расслоение бетона, так и нарушения толщины корпуса, несоосность обечаек и пр.

Конструкция ТУК обеспечивает возможность обращения с ним на всех этапах эксплуатации: на АЭС, в хранилищах ОЯТ горнохимических комбинатов и при внестационарном транспортировании.

Массовая толщина корпуса МБК достаточно велика — до  $200 \text{ g/cm}^2$ . Мощность эквивалентной дозы излучения на поверхности в нормальных условиях эксплуатации 30 (но не более 50!)  $\text{mBarr/h}$ , а на расстоянии 1 м от поверхности —  $10 \text{ mBarr/h}$ . Нормативную радиационную безопасность контейнера, в зависимости от требований к его типу, должны обеспечивать стальные крышки и железобетонные корпус и днище [2]. Некоторые заводы несколько лет назад приступили к производству, а атомные электростанции и атомный флот — к использованию этого малого, портативного и при этом транспортабельного хранилища для ОЯТ — металлобетонного транспортно-упаковочного контейнера ТУК МБК. Около 75 контейнеров уже размещены на площадках долговременного хранения, и проведенные измерения МЭД (мощности эквивалентной дозы) возле этих контейнеров показали, что значения не превышают допустимых.

Однако даже такое вполне надежное описанное здесь сооружение может, как и всякий сложный промышленный продукт, иметь производственные дефекты (например, в бетонном заполнении или в отклонении от КД при изготовлении самого корпуса), и в его ТУ разработчиком — КБСМ был включен обязательный для заводов-изготовителей контроль качества его защиты как прочностной (сплошности бетонного заполнителя), так и биологической — массовой толщины стенки корпуса. Так возникла специфическая задача контроля металлобетонной защиты (МБЗ).

Достоверность и надежность этого контроля выходят на первый план в обеспечении безопасности обращения с ОЯТ и представляются авторам статьи важным и злободневным вопросом. Изначально разработанный стенд такого контроля как техническое решение для реализации выбранной методики [3–8], его кинематика, электронное и программное обеспечение постоянно развиваются и совершенствуются.

## Методика контроля МБЗ

Поскольку поставленная задача дефектоскопии металлобетонного хранилища ОЯТ очевидным образом связана с анализом и оценкой  $\gamma$ -излучения — как уже говорилось, основного радиоактивного излучения отработанного топлива, логично было выбрать методом испытания МБЗ  $\gamma$ -контроль. Сущность метода: при облучении испытуемой металлобетонной защиты (в данном случае — стенки контейнера) радиоисточником  $\text{Co}^{60}$  проводится измерение проникающего излучения в единицах скорости счета (cps) или МЭД ( $\text{mcg/h}$ ).

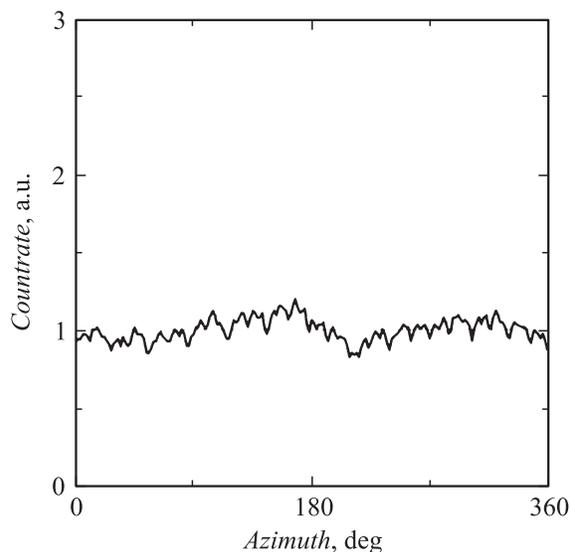


Рис. 2. Типовая гистограмма МБЗ.

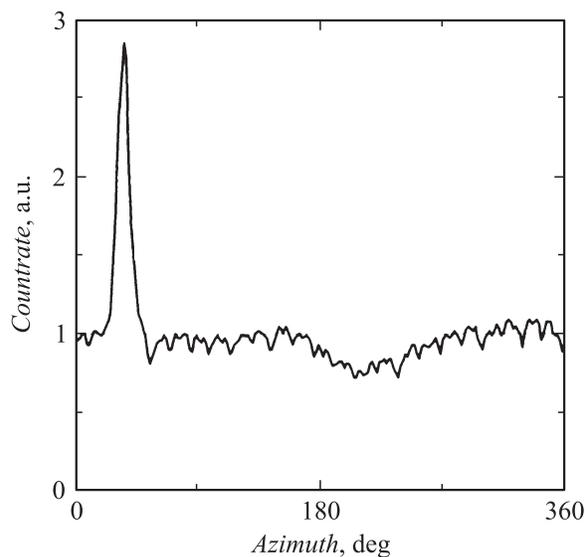


Рис. 3. Гистограмма для случая дефекта.

Результат измерения одной горизонтали („дорожки“) — диаграмма в координатах счет импульсов — угол замера, или гистограмма для нее (рис. 2, 3).

Эта гистограмма есть по сути структурный снимок данного участка РЗ: на ней видна „тонкая структура“ — вертикальные провалы как изображение сетки прутков (арматуры), также видны анкера, накладные фланцы и пр. Но главное — это отражение обнаруженного дефекта бетонной прослойки (полости, щели) в виде пика, по длине основания которого (ось абсцисс) оценивается протяженность дефекта по периметру: высота дефекта при этом вполне точно определяется числом дорожек, на которых этот пик повторяется, поскольку шаг между дорожками известен.

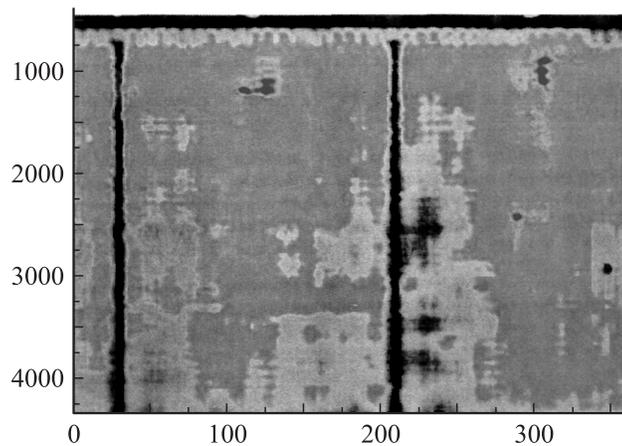


Рис. 4. Карта-развертка боковой поверхности контейнера (картограмма) по результатам гамма-контроля.

Измерение проводится по двум линиям  $Co^{60}$  — 1.173 и 1.332 MeV.

Оценка качества МБЗ (т.е. надежности биозащиты) осуществляется с использованием эталона — образца минимальной массовой толщины стенки корпуса.

Отклонение реальной массовой толщины за пределы допустимого может быть признаком как несоосности, эллипсоидности, конусности обечаек, так и превышения нормы за счет заметной каверны, полости в бетоне. Обнаружение дефекта в бетоне как такового, с определением его координат и размеров, составляет другую часть процесса  $\gamma$ -контроля и решается при обработке данных указанных выше азимутальных „дорожек“. Эта оценка сплошности бетонного заполнителя производится с применением градиентного анализа — сравнения зарегистрированных показаний счета для соседних, близких или значительно удаленных друг от друга по вертикали азимутальных дорожек сканирования поверхности контейнера. При этом дефекты определяются на тех участках МБЗ, где имеют место превышения градиента, не объясняемые отклонением исполнения изделия от КД. Анализ включает приведение предполагаемых дефектов сплошности к площадным, т.е. с одинаковой глубиной  $h$  и с площадью проекции, большей входной апертуры детектора (чтобы сигнал был не связан с границами дефекта). При дефектоскопии сплошности бетона определяются: глубина, площадь дефекта — одного или протяженность нескольких по высоте и периметру контейнера.

Кроме того, в процессе радиометрического контроля выполняется накопительное построение многоцветной суммирующей карты-развертки значений интенсивности гамма-излучения на всей поверхности контейнера (рис. 4); карта отражает в соответствии с заданной цветовой шкалой (24 оттенка) надежные и предположительно слабые места защиты, технологические детали, а также прутки арматуры, шпангоут и многое другое. Три основных цвета дают оператору общее представление о качестве МБЗ.

„Методика контроля массовой толщины и сплошности бетонного заполнителя корпуса металлобетонного контейнера“ аттестована в Госстандарте (Ростехрегулировании). Стенд также аттестован, имеет Патент РФ [4].

## Испытательный стенд

Итак, техническим решением описанной методики является разработанный в ПИЯФ РАН испытательный стенд СГАК — „Стенд Гамма-Контроля“, постоянно, повторно, развиваемый (также группой ПИЯФ). Схематически он показан на рис. 5.

При  $\gamma$ -контроле в качестве регистратора и формирователя логических сигналов используется одноканальный сцинтилляционный спектрометр с автономным низковольтным и высоковольтным питанием, предназначенный для регистрации  $\gamma$ -квантов в диапазоне значений энергий от 0.02 до 3.3 MeV, а в качестве радиоактивного источника — промышленный дефектоскоп с радионуклидом  $Co^{60}$ .

Счетчиком логических сигналов является блок NI 6501 с гальванической развязкой от спектрометра и интерфейсом USB для связи с компьютером.

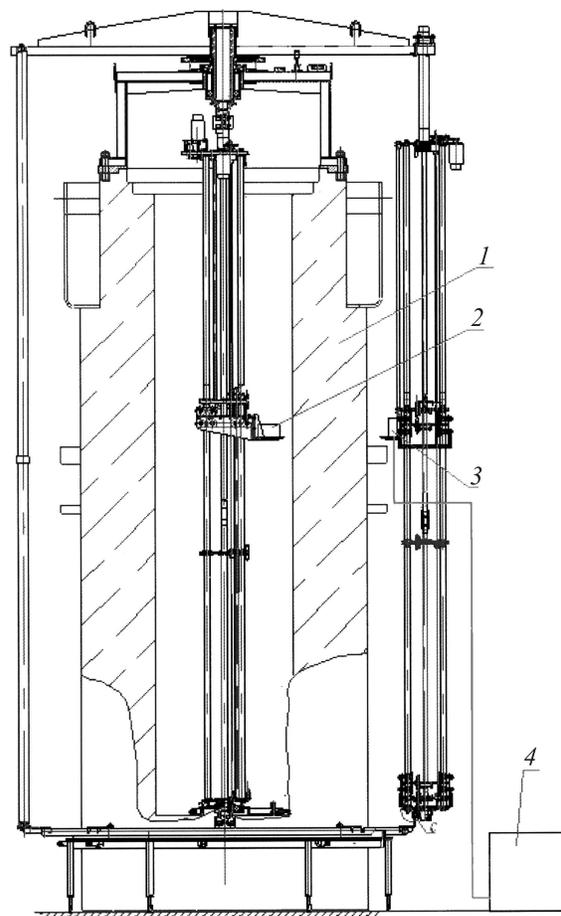


Рис. 5. Стенд контроля металлобетонной защиты СГАК: 1 — контейнер, 2 — гамма-источник, 3 — детектор, 4 — пульт.

Стенд представляет собой электромеханическое устройство, выполняющее синхронное перемещение пары радиоактивный источник–детектор (И–Д) по периметру и высоте контролируемого контейнера с полным сканированием всей его боковой поверхности. Активность применяемого точечного источника 5–10 Ci и сплошное сканирование обеспечивают детальное обследование МБЗ контейнера за рабочую смену. В стенде предусмотрены защита от рассеянного и коллимированное рабочего излучения.

Пара И–Д, перемещаясь синхронно, обходит с постоянной скоростью круг азимутальной дорожки по образующей контейнера за расчетное время, затем смещается вертикально с заданным постоянным шагом для исполнения полного набора „дорожек“ от верхней до нижней отметки по всей вертикали контейнера. Кинематическая часть стенда — это разборное устройство, которое монтируется на контейнере с использованием посадочного места его верхней штатной крышки. Верхний узел является несущим для всей конструкции и собран на основе неподвижной крестовины, которая устанавливается на место и под крепеж крышки контейнера. Связанная с ней через подшипники и редукторную систему подвижная крестовина обеспечивает вращательное (азимутальное) движение двух колонн — внутренней и внешней, несущих каретки соответственно контейнера-коллиматора источника и детектирующего блока.

Для перемещения пары И–Д как по кругу, так и по вертикали применены шаговые двигатели. Текущую угловую координату определяет при этом также шаговый двигатель. Каретка (в каждой из колонн) смещается по вертикали с помощью ходового винта длиной 4 м, на верхнем конце которого установлен абсолютный многооборотный угловой датчик, дающий текущую вертикальную координату. Шаг винта составляет 4 мм, однако отсчет положения по вертикали осуществляется с большой точностью, так как угловой датчик имеет 4096 отсчетов на оборот, что, без учета люфта, дает погрешность 0.001 мм. Устройство также содержит концевые выключатели: по два на каждой из колонн (верхний и нижний) и два — для движения по азимуту (по часовой стрелке и против). Концевые выключатели на неподвижной крестовине — это ограничители движения по периметру, исключающие обрыв кабелей системы.

На пульте дистанционного управления стенда имеется монитор системы видеонаблюдения: видеокамеры отображают как кинематику внутри контейнера (перемещение каретки источника, редукторная система и пр.), так и общую картину в рентгенкамере.

Одноканальный сцинтилляционный спектрометр, используемый для детектирования  $\gamma$ -квантов, окружен дополнительной свинцовой оболочкой, которая обеспечивает защиту боковой поверхности детектора от рассеянного излучения. Такой кожух устанавливается на каретке детектора стационарно и ослабляет рассеянное излучение более чем в 100 раз.

При выполнении штатного сеанса  $\gamma$ -контроля фон у наружной поверхности контейнера 0.7–1.0 мГ/ч (норма для оператора 2.8), в случае дефекта может быть в 10 и более раз выше.

Примененный для регистрации МЭД у поверхности МБЗ спектрометр МКГБ выполнен на основе блока детектирования БДЕГ-63. Диапазон измерения счетного тракта 100–40 000 ср. Чувствительность тракта  $2 \cdot 10^7$  counts/mr. Сам съём информации с детектора при его движении производится с интервалом времени 2 с, общее число таких точек на дорожке — 200.

При обработке данных применяется описанный выше градиентный анализ результатов контроля, когда обнаруженный дефект независимо от формы представляется в виде площадного — в основном бетонном массиве с номинальной плотностью бетона 4.1 г/см<sup>3</sup>.

В последней версии стенда осуществлены его весьма существенные электромеханические усовершенствования.

## Электроника стенда

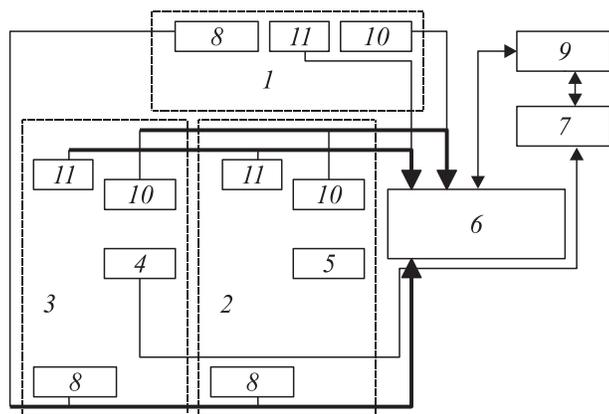
Для оснащения стенда техническими средствами управления перемещениями в азимутальном и вертикальном направлениях двух кареток с размещенными на них источником и детектором излучения использован созданный в ПИЯФ аппаратно-программный комплекс АПК управления перемещениями по 3 осям (плюс резервный канал). На каждой оси — шаговый двигатель и абсолютный датчик позиционирования с синхронным последовательным интерфейсом (SSI) [9].

В соответствии с кинематической схемой стенда для всех трех осей вращения выбраны двухфазные (биполярные) шаговые двигатели типа ДШР116-1,0-1,8УКЛ4 и абсолютные датчики угла типа ЛИР-ДМ136А.

Контроллер системы создан на основе микропроцессора C8051F342. Он обеспечивает логическое управление работой, одновременно либо раздельно, четырех шаговых двигателей посредством четырехканального драйвера этих двигателей, непосредственный съём данных с четырех датчиков углового перемещения с SSI-интерфейсом, а также связь с компьютером (каналы связи: USB либо RS-485). Контроллер имеет гальваническую изоляцию от драйвера ШД, от компьютера (интерфейс RS-485) и от угловых датчиков.

Четырехканальный драйвер униполярных шаговых двигателей создан на основе коммерчески доступного OEM-модуля драйвера G210A и имеет в своем составе логику для обработки состояния четырех пар концевых выключателей, интерфейс с контроллером и обеспечивает выработку силовых импульсов для вращения четырех шаговых двигателей. Драйвер позволяет поканальное неоперативное (ручное) изменение среднего тока двигателя и режима дробления шага ШД.

Специализированный вторичный источник питания содержит три гальванически развязанных преобразователя фирмы ИРБИС и обеспечивает питанием драйвер



**Рис. 6.** Блок-схема системы управления стенда: 1 — крестовина (несущая часть стенда), 2 — колонна источника — внутренняя, 3 — колонна детектора — наружная, 4 — гамма-детектор, 5 — гамма-источник, 6 — управляющая электроника, 7 — счетчик импульсов детектора, 8 — концевой выключатель, 9 — промышленный компьютер, 10 — датчик положения, 11 — шаговый двигатель.

ШД, контроллер и шаговые двигатели. Для питания последних служит встроенный источник МПС 200Е (24 V, 200 W).

Система управления состоит из трех модулей:

RA 153.18 4-канальный SSI-интерфейс

265 × 55 × 235 mm,

RA 153.19 4-канальный драйвер шаговых двигателей

265 × 95 × 235 mm,

RA 422.722 специализированный источник питания

265 × 95 × 235 mm.

Блок-схема системы управления и измерений стенда СГАК показана на рис. 6. Комплект аппаратных средств выполнен на современной элементной базе, имеет резервный канал управления, что повышает живучесть комплекта — важную характеристику при проведении длительных измерений, и позволяет, при двух типах каналов связи с компьютером, размещать его либо непосредственно у стенда — канал связи RS-485, либо возле компьютера (USB).

По сравнению с первой версией стенда осуществлены существенные усовершенствования управляющей электроники:

- вместо двигателей постоянного тока применены шаговые двигатели;

- введены абсолютные датчики положения по каждой из трех осей;

- все каналы стенда сделаны одинаковыми, включая электронику, тип двигателя и тип датчика, что позволяет им быть взаимозаменяемыми;

- в состав системы включен четвертый (резервный) канал;

- вместо специализированной платы для подключения к компьютеру использованы стандартные интерфейсы: USB и RS-485;

- при наличии интерфейса RS-485 электроника может размещаться у стенда, что существенно сокращает длину силовых кабелей;

- увеличенная мощность источника питания, позволяющая одновременное движение по двум осям, обеспечивает таким образом совместное перемещение детектора и источника.

Использование абсолютных угловых датчиков в настоящей версии стенда позволяет определять действительные координаты источника, детектора и угловое положение колонн.

Использование шаговых двигателей и датчиков позиционирования способствует большей надежности определения координат пары И–Д и, значит, повышению достоверности результатов измерений.

## Программное обеспечение

### Общие сведения о программном обеспечении

Программа написана в среде разработки National Instruments Lab Windows/CVI на языке ANSI и выполняется в операционной среде Windows 2000/XP/VISTA/Windows 7 (режим эмуляции Windows XP).

Программа предназначена для управления работой стенда, контроля работоспособности механической, электрической и спектрометрической его частей, съема и сохранения всей текущей информации, оперативной обработки и визуализации результатов измерений.

С момента каждого запуска программы ведется запись в файл protocol обо всех действиях в данной системе, как, например, запуск программы, открытие окон (проверка механики, настройка измерительного тракта, измерение боковой поверхности контейнера), изменение значений параметров, выход из любого режима, информация о всех сбоях аппаратуры.

Программа выполняет следующие виды работы:

- ввод параметров,
- контроль боковой поверхности контейнера.

В режиме **Ввод параметров** выполняется задание, просмотр, редактирование параметров стенда и контейнера; выполняется проверка работоспособности и позиционирование кареток источника и детектора в любой точке боковой поверхности контейнера, юстировка пары источник–детектор.

### Контроль боковой поверхности контейнера

При запуске режима **Контроль боковой поверхности контейнера** открывается окно для ввода параметров сканирования и затем осуществляется цикл измерений для контроля качества боковой поверхности контейнера с визуализацией процессов измерения и обработки данных.

При контроле боковой поверхности контейнера on-line на экран выводится:

- информация о дефектных точках (дефектной считается точка, мощность дозы в которой превышает

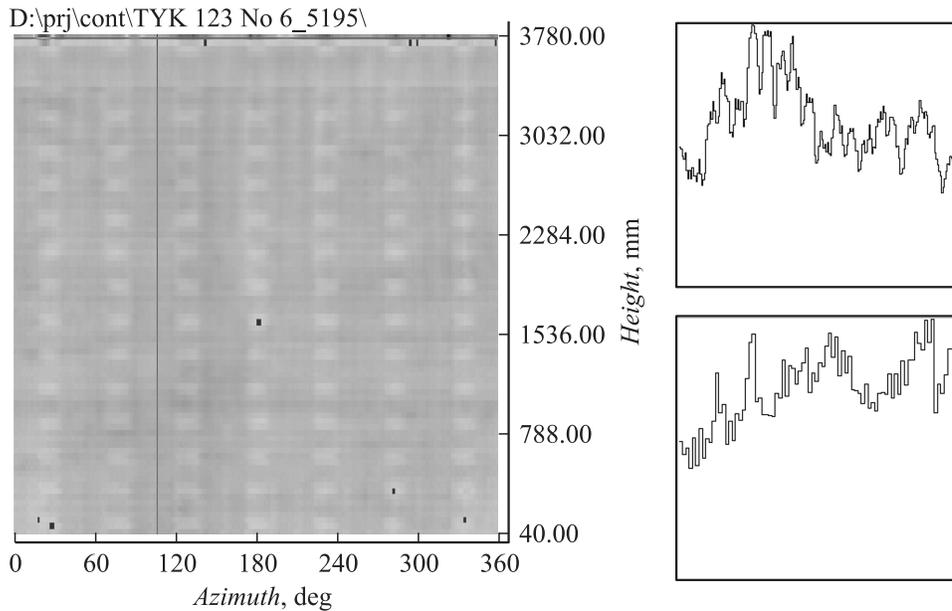


Рис. 7. Окно программы обработки результатов контроля МБЗ SCAN 2D.

условное значение параметра „Порог фиксации дефекта“);

- информация о времени и количестве измеренных периметров;
- текущее положение пары источник–детектор по периметру и по вертикали;
- текущее значение мощности дозы;
- общая карта-развертка всей поверхности контейнера;
- график текущего периметра и график предыдущего периметра (гистограммы).

Для каждого измеренного периметра формируется отдельный файл, что позволяет повторять измерение отдельных периметров. Помимо этого пишется файл, содержащий все зафиксированные дефекты, и файл-протокол.

## Обработка результатов измерений

Оценка погрешности метода и стенда: контроль эталона подтвердил выполнение требования КД на серийный контейнер в части чувствительности метода контроля отклонений массовой толщины МБЗ — не хуже  $3.4 \text{ g/cm}^2$ .

При определении точности метода и конкретно — выполнения  $\gamma$ -контроля — следует оценить и учесть погрешность измерения счета импульсов в случае нештатного положения источника относительно детектора при монтаже стенда на корпусе МБК. Для автоматизированной off-line обработки результатов контроля как радиационной защиты, так и сплошности бетонного заполнителя корпуса, МБК разработана и применяется компьютерная программа SCAN 2D (рис. 7), апробированная при работе с большой серией контейнеров. При

отсутствии отклонений от штатной работы стенда она по окончании сеанса контроля выполняет по команде оператора полную обработку полученных результатов: после загрузки в нее последних автоматически перебирает все файлы каталога и выбирает те из них, которые относятся к измерениям, затем располагает их в порядке возрастания высоты и приводит к одному количеству угловых точек.

Программа оперативно оформляет проект Заключения о годности/отбраковке изделия: по радиационной защите — при сравнении данных из файла контроля МБК с ранее загруженным в нее реперным файлом с результатами контроля образца стенки минимальной массовой толщины корпуса, по качеству бетонного заполнителя указывает габариты и координаты полостных дефектов при их обнаружении. Программа выделяет дефекты на кадре дисплея и выдает отчет о них в правой части окна. В составе программы также применен градиентный анализ зарегистрированного счета импульсов.

Оцененная величина погрешности стенда и описанной дефектоскопии не превышает 10%.

## Заключение

При оценке возможностей и достоинств метода анализ собранного материала производился на основе использования результатов расчета величин излучения на внешней поверхности контейнера в геометрии опыта, данных по измерению габаритных фактических размеров контейнера, данных по плотности бетона в образцах-свидетелях и др.

Новая версия конструкции, механико-кинематического устройства, АПК и программного обеспечения испытательного стенда СГАК отработана при  $\gamma$ -контроле

корпусов ТУК МБК около трех десятков серийных изделий, контроль сплошности бетонного заполнителя и радиационной защиты контейнеров с использованием стенда выполнен на ряде заводов при изготовлении свыше 250 МБК.

Обработка полученных при этом результатов по указанной выше программе SCAN 2D и др., анализ собранных данных и оценка погрешностей измерений подтвердили применимость и достоверность разработанной методики, как и надежность работы стенда.

Авторы признательны О.М. Голубеву за участие в выборе и разработке методики, в выполнении работ по контролю МБК на Ижорском заводе, заводе „Севмаш“ г. Северодвинск, в Сумах и в ЗАО „Энерготекс“, а С.Л. Смольскому — за постоянный интерес к этим работам и их поддержку.

Благодарим также Е.А. Крондеву за помощь в оформлении публикации.

## Список литературы

- [1] *Radioactive substances safe transporting standarts ST-1*. IAEA, Vienna, 1996. Нормы безопасности при транспортировке р/а материалов НП-053-04. 2004.
- [2] *Guskov W.D., Korotkov G.V. et al. // 5 Int. Conf. on the NPP Mater. Sci. Iss.* 1998. Pushkin.
- [3] *Щиголов Н.Д., Блинные Ю.С. и др. // VII Росс. науч. конф. „Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок“*. Обнинск, 1998. С. 191.
- [4] *Пат. РФ № 2152097 „Устройство для контроля цилиндрических конструкций с использованием  $\gamma$ -излучения от р/а источника“*.
- [5] *Shchigolev N., Blinnikov Ju., Golubev O., Guskov V., Kolivanova N., Ploshchansky L., Poljakov V., Smolsky S., Shuljak G., Sushkov P. // PNPI research report. 1998–1999*. Gatchina, 2000. P. 217.
- [6] *Shchigolev N.D. et al. // Int. Conf. on Storage of Spent Fuel from Power Reactors*. IAEA, Vienna, 2003. P. 21.
- [7] *Щиголов Н.Д., Голубев О.М. „Вопросы гамма-контроля качества сложной металлобетонной защиты“*. Препринт ПИЯФ-2601. Гатчина, 2005.
- [8] *Shchigolev N., Golubev O. // Conf. „Decommissioning Challenges“*. Avignon, 2008. P. 22–23.
- [9] *Касман Я.А., Колхидашвили М.Р., Марченков В.В., Пирогов А.М., Соловей В.А., Щиголов Н.Д.* Многоканальные аппаратные средства управления перемещения с использованием шаговых двигателей и абсолютных датчиков позиционирования с синхронным последовательным интерфейсом. Препринт ПИЯФ-2790. Гатчина, 2009.